한국지반공학회논문집 제34권 7호 2018년 7월 pp. 51 ~ 58
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.34, No.7, July 2018 pp. 51 ~ 58

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2018.34.7.51

원심모형 실험을 이용한 지반-말뚝 상호작용의 정적 및 동적 거동 평가

Comparison of Lateral Pile Behavior under Static and Dynamic Loading by Centrifuge Tests

유 민 택[1] Yoo, Min-Taek
권 선 용[2] Kwon, Sun-Yong

Abstract

In this study a series of centrifuge tests were carried out in dry sand to analyze the comparison of lateral pile behavior for static loading and dynamic loading condition. In case of static loading condition, the lateral displacement was applied up to 50% of pile diameter by deflection control method. And the input sine wave of 0.1 g～0.4 g amplitude and 1 Hz frequency was applied at the base of the soil box using shaking table for dynamic loading condition. From comparison of experimental static p-y curve obtained from static loading tests with API p-y curves, API p-y curves can predict well within 20% error the ultimate subgrade reaction force of static loading condition. The ultimate subgrade reaction force of experimental dynamic p-y curve is 5 times larger than that of API p-y curves and experimental static p-y curves. Therefore, pseudo-static analysis applied to existing p-y curve for seismic design could greatly underestimate the soil resistance at non-linear domain and cause overly conservative design.

요 지

본 연구에서는 하중 조건에 따른 지반-말뚝 상호작용 시스템의 거동 차이를 분석하기 위해 일련의 원심모형 실험을 수행하였다. 정적 하중 조건의 경우, 말뚝 직경의 50% 수준까지 변위제어를 통해 하중을 재하하였으며, 지진 하중 조건의 경우 0.1g～0.4g 수준으로 1Hz 정현파를 가진하였다. 실험 결과로부터 얻은 정적 및 동적 p-y 곡선을 API p-y 곡선과 비교한 결과, API p-y 곡선과 정적 하중조건에서의 실험 p-y 곡선은 최대 지반반력 값이 20% 이내의 오차를 보인 반면, 동적 하중 조건에서의 실험 p-y 곡선과는 최대 지반반력 값이 5배 이상 차이가 발생하였다. 이는 등가정적 해석에서 기존 API p-y 곡선을 적용할 경우 비선형 영역에서 지반 반력을 크게 과소평가하며 보수적 설계를 야기할 수 있음을 의미한다.

Keywords : Centrifuge test, Soil-structure-interaction, Dynamic p-y curve, Static p-y curve, API p-y curve

1 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute)
2 정회원, 한국환경정책·평가연구원 부연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Environment Institute, Tel: +82-44-415-7322, Fax: +82-44-415-7744, sykwon@kei.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2018 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

지진하중을 비롯한 횡방향 하중을 받는 말뚝 기초를 모델링 하는 방법으로 지반의 비선형성을 고려할 수 있는 p-y 곡선법이 널리 이용되고 있다. 정적인 하중조건에 대해서는 API(1987) p-y 곡선이 널리 사용되고 있으나 아직까지 지진 하중과 같은 동적 하중 조건에 대해서는 동적 p-y 곡선이 확실히 정립되어 있지 않다. 이로 인해 내진 설계를 위한 등가정적해석시 정적 p-y 곡선을 그대로 사용하거나 반복하중을 가하여 산정한 수정된 정적 p-y 곡선(NCHRP, 2001)을 사용하고 있는 실정이다. 최근 Yang et al.(2011)과 Yoo et al.(2013)의 연구에 따르면 API p-y 곡선이 비선형영역에서의 동적지반반력을 과소 평가하고 있으며, 정적 p-y 곡선을 사용하여 등가정적해석을 수행한 결과가 지진시 말뚝에 발생하는 실제 모멘트 및 변위를 과대 평가하는 것으로 나타났다. 그러나 기존의 연구들은 실제 구속압을 모사하지 못한 1g 진동대 실험을 이용하여 얻은 결과이며 또한 정적 하중 재하 실험은 수행하지 않아 하중 재하방식에 따라 말뚝에 발생하는 실제 거동 차이를 분석하지 못하였다.

이에 본 연구에서는 정적 및 동적 하중 조건에서 말뚝의 횡방향 거동차이를 분석하기 위해 건조 사질토 지반에 근입된 말뚝에 대해 원심모형실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 얻은 정적 p-y 곡선 및 동적 p-y 곡선을 이용하여 하중 조건에 따른 말뚝 거동 차이를 분석하였으며 실험을 통해 얻은 p-y 곡선과 기존의 p-y 곡선을 비교하여 기존 p-y 곡선의 타당성을 검증하였다.

2. 원심모형 실험 조건

본 연구에서는 팔길이 5m, 최대 2.4톤의 무게를 100g의 원심가속도까지 올릴 수 있는 KAIST 동적 원심모형실험기를 이용하여 원심가속도 40g 조건에서 실험을 수행하였으며 4자유도 로봇을 이용하여 말뚝을 관입하였다. 실험에 사용된 모형 토조는 ESB(Equivalent Shear Beam) 상자로서 모형 토조의 크기는 길이 49cm, 폭 49cm, 높이 63cm 이며, 높이 방향으로 6cm 두께의 띠모양 요소들이 고무 버클로 연결되어 있어 지반 진동하에서 토조가 지반과 함께 변형을 일으켜 토조 가장자리에서의 반사파 발생을 줄여주도록 되어 있다.

실험에 사용된 모형 말뚝은 외경 10mm, 두께 1mm의 알루미늄관으로 제작하였으며, 모형말뚝의 제원은 Table 1에 정리하였다. 본 실험의 경우 동일한 조건에서 서로 다른 두 종류의 하중 재해가 필요했으며, 이에 원심가속도 수준에서 작동 가능한 in-flight 로봇, 2차원 진동대 등 다양한 장비의 적용이 필요했다. 이로 인해 높은 수준의 원심 가속도 수준의 구현이나 직경이 큰 말뚝 제작에 한계가 존재했으며, 명확한 횡방향 거동 파악을 위해 실제 말뚝보다 직경이 작고 세장비가 큰 모형 말뚝을 적용하였다. 모형 지반은 파쇄(Hammer crusher) 공정에 의해 인공적으로 생산한 규사를 이용하여 조성하였으며 사용된 규사의 입도분포 곡선 및 물리적 특성을 Fig. 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 말뚝 직경은 지반 조성에 사용된 규사 유효입경(D10)의 87배로 말뚝 직경이 유효 입경의 30배 이상이 되면 원심모형실험에서 입자 크기가 말뚝에 미치는 영향이 없다는 Ovesen(1979)의 연구 결과를 만족시켰다.

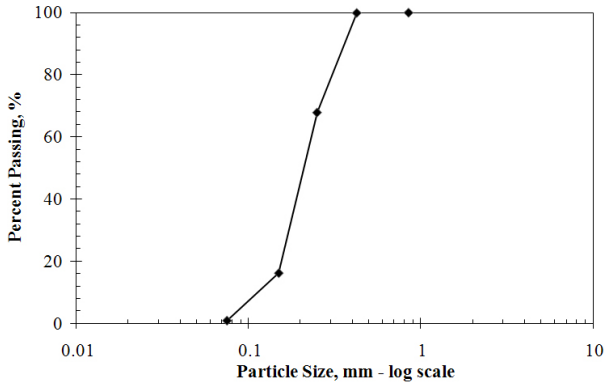


Fig. 1. Particle size distribution of silica sand

Table 1. Model pile properties

	Model	Scale factor	Prototype
Diameter (cm)	1	λ	40
Thickness (cm)	0.1	λ	4
Length (cm)	35	λ	1400
Penetration depth (cm)	30	λ	1200
Flexural stiffness (kgf·cm^2)	20,043	λ^4	5.1 × 1010

Table 2. Soil properties of silica sand

Soil	Silica sand
Soil classification (USCS)	SP
Max. dry unit weight, ρd,max (g/cm^3)	1.65
Min. dry unit weight, ρd,min (g/cm^3)	1.24
Specific gravity (Gs)	2.65
D50 (mm)	0.2

실험은 2개의 모형 말뚝을 이용하여 각각 정적 하중 실험과 동적 하중 실험을 수행하였다. 각각의 모형 말뚝은 원심가속도 40g 조건에서 0.5mm/s의 속도로 관입하였다. 최종적으로 완성된 실험 단면은 Fig. 2와 같다. 말뚝 단면의 양쪽에는 5쌍의 변형율계를 부착하여 진동 중에 발생하는 말뚝 깊이별 모멘트를 측정하였으며 가속도계를 말뚝 상부질량과 변형율계의 위치와 동일한 지반 내에 설치하여 말뚝과 지반의 가속도 응답을 측정하였다. 모형말뚝에 부착한 변형율계는 모형말뚝을 관입시킬 때 말뚝 표면에 발생하는 강한 마찰력을 견디어 낼 수 있도록 Fig. 3과 같이 에폭시로 코팅하여 단단하게 부착하였다.

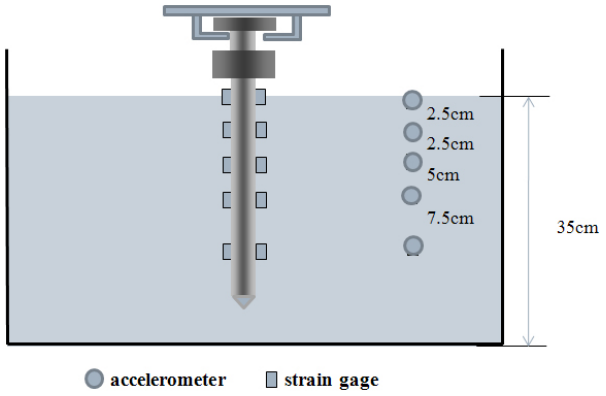


Fig. 2. Schematic drawing of test section

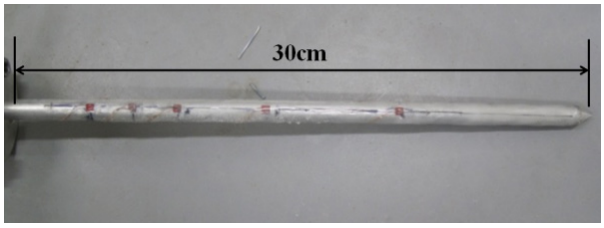


Fig. 3. Model pile

정적 하중 실험의 경우 말뚝을 30cm 관입 시킨 이후에 초당 말뚝 직경의 1%씩 (0.1mm/s) 횡방향 변위를 가하였으며 ASTM의 횡방향 하중실험 방법에 따라 말뚝 두부 변위가 말뚝 직경의 10%가 되면 15초간 변위 상태를 유지하였다. 총 5단계에 걸쳐 변위를 가하여 최종적으로 말뚝 두부의 변위가 직경의 50%가 될 때까지 실험을 수행하였다. 동적 하중 실험의 경우, 말뚝의 관입이 완료된 후 원심가속도 40g 상태에서 진동하중을 가하여 말뚝의 동적 거동을 살펴보았다. 진동하중은 가속도 크기와 진동수 변화가 용이한 정현파를 이용하였고, 가속도 크기와 진동수는 각각 원형기준 0.1g~0.4g, 1Hz 이었으며, 실험 계획은 Table 3과 같다.

3. 원심모형 실험 결과

3.1 실험 p-y 곡선 산정 방법

말뚝에 부착된 깊이별 변형률계에서 하중 재하시 말뚝에 작용하는 횡방향 변형률 값이 계측되며, 계측된 변형률 값이 일반적인 역학 이론인 식 (1)을 적용하여 말뚝의 깊이별 변형률 값을 산정하였다.

$$M = \frac{EI}{y}\varepsilon \tag{1}$$

산정된 깊이별 분연속 모멘트 결과를 통해 말뚝의 깊이별 모멘트 분포 곡선을 결정하였으며 식 (2)와 같은 빔 이론에 따라 지반반력 p와 말뚝 변위 y_{pile}을 산정하였다. 깊이별 모멘트 분포 곡선은 총 5곳의 깊이에서 계측된 모멘트 자료에 cubic spline 보간 방법을 적용하여 구하였다(Dou and Byrne, 1996).

$$p = \frac{d^2}{dz^2}M(z), \quad y_{pile} = \iint \frac{M(z)}{EI}dz \tag{2}$$

여기서, EI : 말뚝의 휨강성, z : 깊이, M(z) : 깊이에 따른 모멘트 분포 곡선

Table 3. Tests program

Loading condition	Method of applying loading	Relative density
Static load	Displacement control of 0.1 mm/s	80%
Dynamic load	Sine wave with a frequency of 1 Hz and with an amplitude ranging from 0.1 g to 0.4 g	

단, 동적 p-y 곡선의 경우, 데이터 계측과 수치 미적분 과정에서 필연적으로 발생하는 노이즈 성분을 제거해야 한다. 이를 위해, 계측된 모멘트 결과에 대한 FFT 해석을 수행한 후에 2차 모드까지 포함하는 Band Pass Filtering을 적용하여 데이터의 노이즈를 제거하였다. 또한, 지진 하중과 같은 동적 하중의 경우 지반 자체의 변위가 발생하므로 p-y 곡선의 y 값이 지반-말뚝 간의 상대 변위가 되어야 한다. 따라서 동적 p-y 곡선의 y를 구하기 위해서는 식 (1)에서 구한 y_{pile}에서 지반 변위 y_{soil}을 빼야 한다. 이 때, y_{soil}은 각 높이에서 계측된 가속도 자료를 2번 적분하여 구한다.

3.2 실험 정적 p-y 곡선

본 실험에서 얻은 모든 결과는 상사비 40을 적용하여 원형 스케일로 나타내었다. Fig. 4는 정적 하중 조건에서 구한 직경의 1배(40cm) 및 직경의 3배(120cm)에서의 정적 p-y 곡선이다. 그림에서 나타나듯이 변위를 가할수록 지반 반력이 증가하였으며, 변위 상태를 유지하는 동안 지반반력이 감소하였다가 다시 변위를 가하면 지반 반력이 증가하는 경향을 보였다. 말뚝 직경의 1배 깊이에서는 두부 변위가 말뚝직경의 30%가 되었을 때, 최대 지반반력이 발생하고 그 후에 지반반력이 감소하는 현상이 나타났으며, 말뚝 직경의 3배 깊이에서는 최대 지반반력이 발생하는 말뚝 두부 변위가 증가하는 경향을 보였다. 이는 깊이가 깊어질수록, 말뚝에 발생하는 횡방향 변위가 줄어들기 때문이며 최대 지반반력이 발생하는 말뚝 두부 변위는 깊이에 관계없이 일정함을 확인 할 수 있다. 말뚝에 발생하는 지반반력은 깊이가 깊어질수록 증가하는 경향을 보였다.

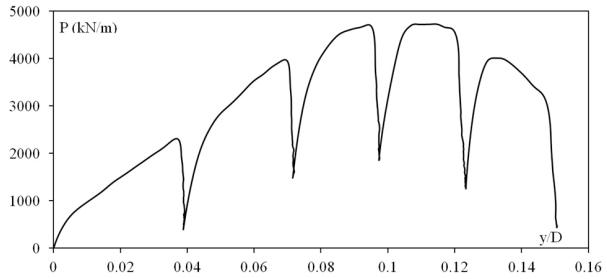
3.3 실험 동적 p-y 곡선

Fig. 5는 동적 하중 조건에서 구한 동적 p-y 곡선을 나타낸다. 그림에서 보면 입력하중의 가속도 크기가 증가함에 따라 상부구조물에서 발생하는 관성력의 크기가 증가하여, 상부하중 관성력에 의한 말뚝의 변위가 증가하였으며 지반반력 역시 증가하는 경향을 보였다. 그러나 가속도 크기가 증가함에 따라 각 입력 가속도 수준에서의 할선 기울기 값은 감소하는 것을 알 수 있는데 이로부터 본 실험에서 구한 실험 동적 p-y 곡선이 비선형 거동을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

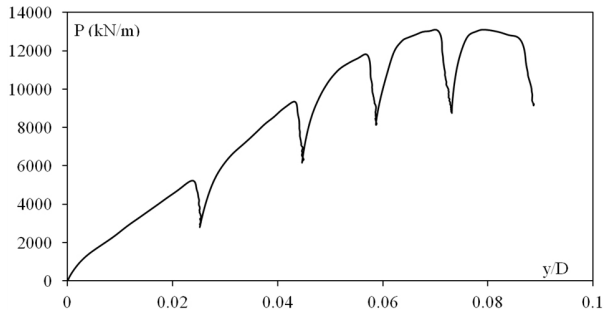
동적 p-y 곡선을 실험을 통해 얻은 정적동적 p-y 곡선 및 기존 p-y 곡선과 비교하기 위하여 동적 p-y 중추곡선을 구축하였다. 이 중추곡선은 실험에서 구한 깊이별 동적 p-y 곡선에서 최대 지반반력 점을 찾아낸 후, 이점들을 Kondner(1963)가 제안한 쌍곡선 함수로(식 (2)) 연결하여 완성하였다(Ting et al., 1987; Yang et al., 2011).

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{ini}} + \frac{y}{p_u}} \tag{2}$$

여기서, k_{ini} = 초기지반반력계수, P_u = 극한지반반력, y = 지반 말뚝 상대 변위



(a) p-y curve at the depth of 1D



(b) p-y curve at the depth of 3D

Fig. 4. Experimental static p-y c

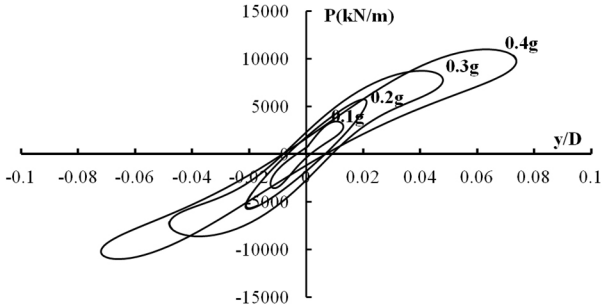


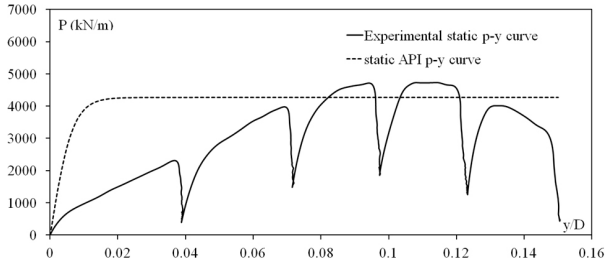
Fig. 5. Experimental dynamic p-y curve at depth of 1D

4. 기존 p-y 곡선과의 비교

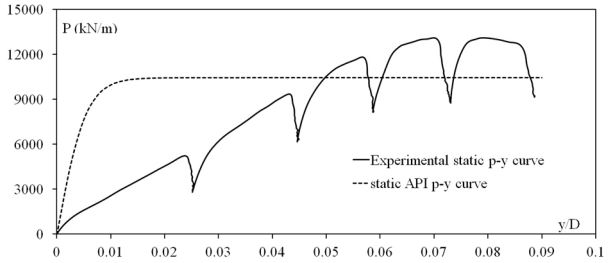
본 연구에서 실험을 통해 구한 정적 p-y 곡선 및 동적 p-y 중추곡선을 현재 말뚝의 횡방향 거동 해석에 널리 이용하는 p-y 곡선과 비교하였다. 비교에 사용된 기존 곡선은 가장 널리 사용되고 있는 API p-y 곡선(1987)이다. API는 하중 조건에 따라 반복하중과 정적하중에 대해 p-y 곡선을 제안하였으며, 반복 하중의 경우 말뚝 직경의 2.6배보다 얕은 깊이에서 하중 반복에 의한 지반반력의 감소효과를 고려하여 정적하중의 경우보다 작은 지반반력을 갖도록 제안되었다.

4.1 실험 정적 p-y 곡선과 API static p-y 곡선 비교

Fig. 6은 실험 정적 p-y 곡선과 정적 하중에 대한 API p-y 곡선을 비교한 결과이다. 그림에 나타나듯이 기존 정적하중에 대한 API p-y 곡선은 말뚝 직경의 1~2% 수준에서 최대 지반반력 값이 나타났으며, 특별한 항복 강도를 보이고 있지 않다. 그러나 실험에서 구한 정적 p-y 곡선의 경우 말뚝 직경의 6~10% 수준에서 최대 지반반력이 발생하였고 이후 항복 이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해, 최대 지반반력이 발생하기 전 영역에서는 기존 API p-y 곡선이 실험 정적 p-y 곡선보다 지반반력을 크게 평가하는 것으로 나타났으며, 이러한 지반반력 차이는 말뚝의 변위가 증가할수록 감소하였다. 이러한 결과는 실제 설계 하중 영역인 말뚝 직경의 1~2% 변위 영역에서 기존 API p-y 곡선이 실제 지반 반력을 과대평가하고 있음을 의미하며, 이는 말뚝에 작용하는 변위와 모멘트를 과소 평가하여 위험측 설계를 야기할 수 있음을 의미한다.



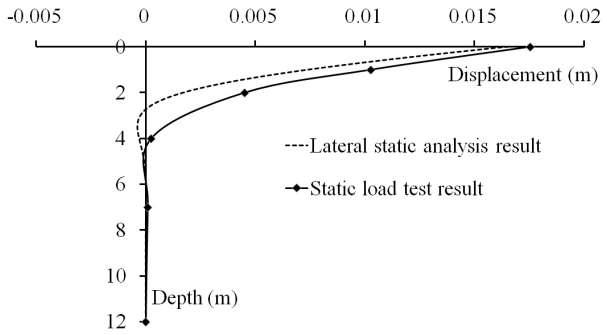
(a) p-y curve at the depth of 1D



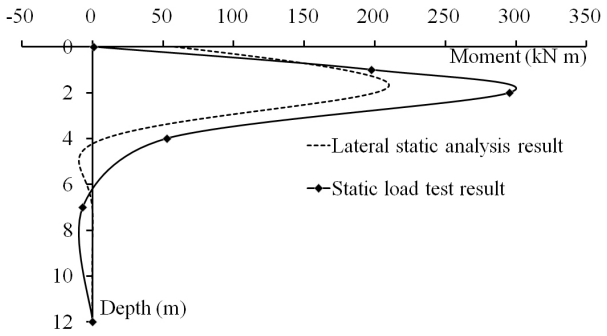
(b) p-y curve at the depth of 3D

Fig. 6. Experimental static p-y curve and the static API p-y curve

앞서 언급한 p-y곡선의 차이가 실제 말뚝 거동해석에 미치는 영향을 알아보기 위하여 정적 하중에 대한 API p-y곡선을 이용하여 수행한 횡방향 정적 해석결과와 실제 실험에서 말뚝에 발생한 깊이별 모멘트 및 변위를 비교하였다. 해석에 사용된 프로그램은 LPILE 5.0이며 실제 실험 조건과 동일한 입력값을 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 7은 말뚝 두부 변위가 말뚝 직경의 10%(0.1D)인 경우에 대한 깊이별 변위 곡선과 깊이별 모멘트 곡선을 나타내고 있다. 그림에 나타나듯이 정적 하중에 대한 API p-y 곡선을 이용하여 구한 해석 결과가 실제 말뚝에 발생하는 변위 및 모멘트를 각각 10%, 40% 정도 과소 평가하고 있다. 이는 정적 하중에 대한 API p-y 곡선이 최대 지반반력이 발생하는 변위를 과소평가하며, 이로 인해 말뚝에 최대 지반반력이 발생하기 전 영역에서 정적 하중에 대한 API p-y 곡선이 말뚝에 발생하는 정적 횡방향 지반반력을 과대평가하기 때문으로

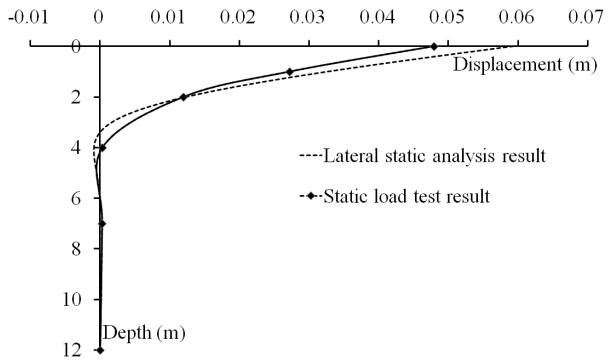


(a) Deflection curve along the pile depth

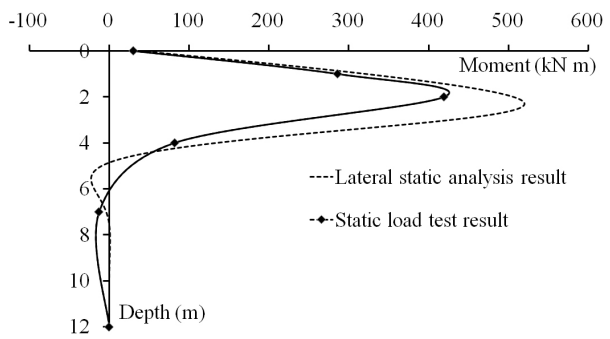


(b) Moment curve along the pile depth

Fig. 7. Comparison of the lateral static analysis result and the static load test result (the displacement of the pile head = 0.1D)

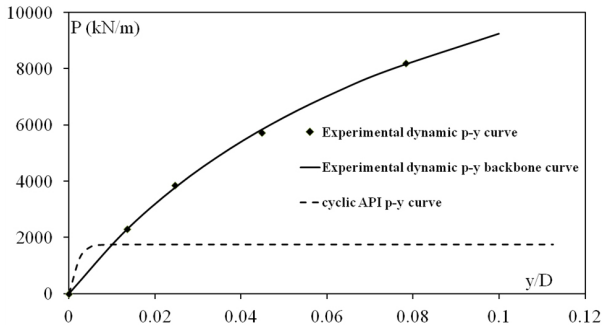


(a) Deflection curve along the pile depth

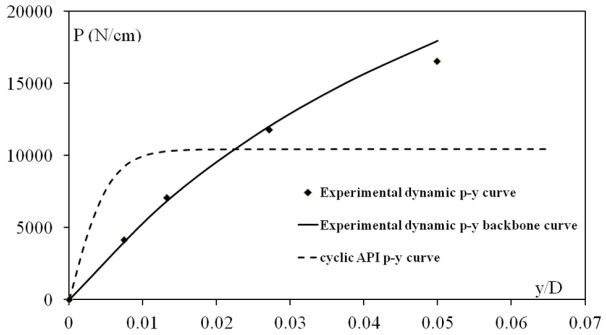


(b) Moment curve along the pile depth

Fig. 8. Comparison of the lateral static analysis result and the static load test result (the displacement of the pile head = 0.3D)



(a) p-y curve at depth of 1D



(b) p-y curve at depth of 3D

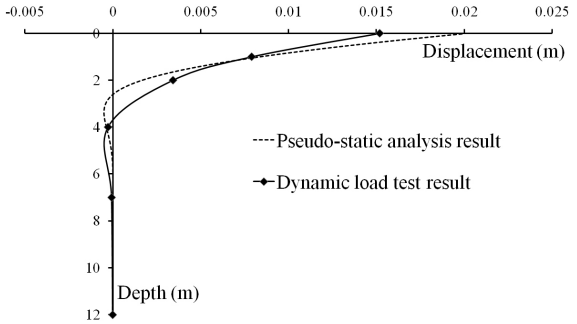
Fig. 9. Experimental dynamic p-y backbone curve and the cyclic API p-y

판단된다. 이에 비해 Fig. 8과 같이 최대 지반반력이 발생한 영역인 말뚝 두부 변위가 말뚝 직경의 30%(0.3D)인 경우에는 정적 하중에 대한 API p-y 곡선을 이용하여 구한 해석 결과가 최대 변위 및 모멘트를 각각 15%, 25% 정도 과대평가하는 것으로 나타나는데 이는 정적 하중에 대한 API p-y 곡선이 말뚝에 발생하는 지반반력을 과소 평가하기 때문이다.

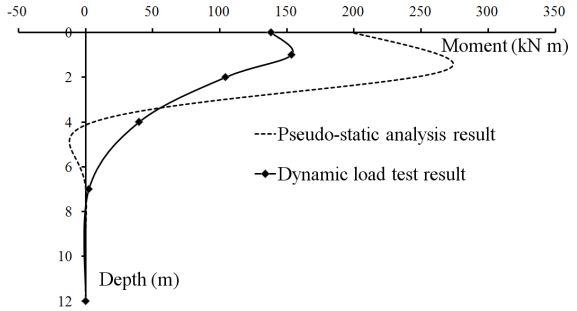
4.2 실험 동적 p-y 곡선과 API cyclic p-y 곡선 비교

앞서 3.3에서 산정한 실험 동적 p-y 중추 곡선과 반복하중에 대한 API p-y 곡선(API cyclic p-y curve)을 Fig. 9에 도시하였다. 동적 p-y 중추곡선과 반복하중에 대한 API p-y 곡선을 비교한 결과, 도로교 설계기준(2001)에서 정한 말뚝의 탄성영역인 말뚝 직경 1%이내의 초기 변형률 영역에서는 반복하중에 대한 API p-y 곡선이 실험 동적 p-y 중추곡선보다 지반반력을 다소 크게 평가하거나 유사한 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 비선형 영역의 경우, API p-y 곡선이 실제 말뚝에 발생하는 지반 반력을 1/5까지 작게 평가하는 것으로 나타났다. 이는 기존 한계상태설계법의 탄성영역 설계에서는 큰 문제가 발생하지 않을 수 있으나, 향후 성능기반 내진 설계를 적용하여 비선형 영역에서의 내진설계를 수행할 경우, 반복하중에 대한 API p-y 곡선을 적용하면 실제 지진하중에 대해 크게 보수적인 결과를 초래할 수 있다.

API에서는 p-y 곡선을 이용하여 내진설계를 수행할 경우, 반복하중 조건의 p-y 곡선을 사용할 것을 권장하고 있으며 이에 본 연구에서는 반복하중에 대한 이용하여 등가정적 해석을 수행하고, 이를 동적 실험 결과와 비교하였다. Fig. 10은 입력가속도 0.1g 조건에서의 실험 결과와 등가정적해석 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 나타나듯이, 등가정적해석 결과가 실제 말뚝에 발생하는 최대 변위 및 모멘트를 각각 20%, 80%까지 과대평가하는 것으로 나타났다. 또한 이러한 오차는 오히려 반복하중에 대한 API p-y곡선을 이용한 경우 크게 나타났다. 또한 Fig. 11에서 나타나듯이 입력가속도 0.4g 조건에서는 이러한 오차가 더 크게 발생하여 등가정적 해석결과가 실제 말뚝의 최대 변위 및 모멘트를 약 150% 정도 과대평가하고 있다. 이는 앞서 언급하였듯이 API p-y곡선이 비선형 영역에서의 동적 거동에 있어서 말뚝

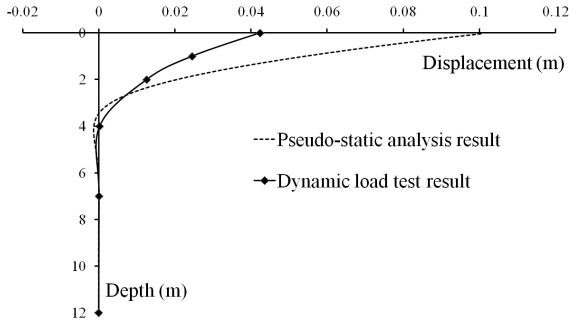


(a) Deflection curve along the pile depth

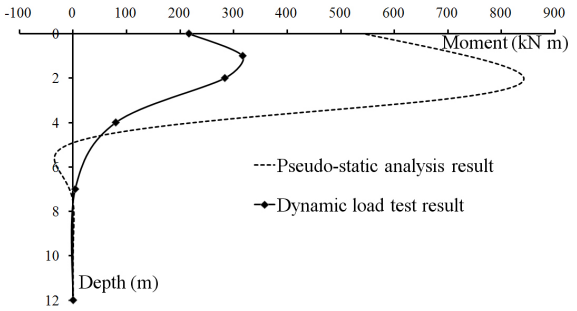


(b) Moment curve along the pile depth

Fig. 10. Comparison of the pseudo-static analysis result and the dynamic load test result (input acceleration = 0.1g)



(a) Deflection curve along the pile depth



(b) Moment curve along the pile depth

Fig. 11. Comparison of the pseudo-static analysis result and the dynamic load test result (input acceleration = 0.4g)

에 발생하는 지반반력을 과소평가하고 있기 때문이며 이러한 지반반력의 차이는 변위가 크게 발생할수록 더 크게 발생하며 이에 큰 입력가속도 조건에서 오차가 크게 발생한 것으로 생각된다. 일련의 실험 결과를 통해 반복하중에 대한 API 곡선을 이용하여 내진설계를 수행할 경우 실제 지진하중하에서 크게 보수적인 결과를 초래할 가능성이 있다고 판단된다.

5. 결 론

원심모형 실험을 이용하여 하중 재하 방법(정적하중, 동적하중)에 따른 말뚝의 동적 횡방향 거동 차이에 대해 알아보았으며, 실험을 통해 얻어진 각 하중조건에서의 p-y 곡선 및 말뚝의 거동을 API p-y 곡선을 이용하여 얻은 횡방향 정적해석 결과 및 등가정적해석 결과와 비교하였다.

(1) 실험을 통해 얻어진 정적 p-y 곡선을 정적하중에 대한 API p-y 곡선과 비교한 결과, 정적하중에 대한 API p-y 곡선이 실제 말뚝에서 최대 지반반력이 발생하는 변위를 과소평가하였으며, 이는 설계 하중 영역에서의 지반반력을 과소 평가하여 위험측 설계를 야기할 수 있음을 의미한다.

(2) 정적 하중에 대한 API 곡선을 적용하여 횡방향 정적 해석을 수행한 결과와 실제 정적 실험 결과를 비교한 결과, 정적 하중에 대한 API p-y곡선을 적용한 횡방향 정적 해석 결과가 실제 말뚝에 발생하는 변위 및 모멘트를 설계하중 영역에서는 각각 10%, 40% 과소평가하였다.

(3) 실험을 통해 얻어진 동적 p-y 중추곡선을 일반적으로 내진 해석에 사용되는 반복하중에 대한 API p-y 곡선과 비교한 결과, 말뚝 직경 1% 이내의 초기 변형률 영역에서는 반복하중에 대한 API p-y 곡선이 실험 동적 p-y 중추 곡선의 지반 반력을 다소 크게 평가하거나 유사한 거동을 보였으나, 지진시 발생 가능한 말뚝 직경 1% 이상의 비선형 영역의 경우에서는 반복하중에 대한 API p-y 곡선이 실제 말뚝에 발생하는 지반반력을 최대 1/5까지 작게 평가하였다.

(4) 반복 하중에 대한 API p-y곡선을 적용하여 등가정적 해석을 수행한 결과와 실제 동적 실험 결과를 비교한 결과, 반복 하중에 대한 API p-y곡선을 적용한 등가정적해석 결과가 실제 말뚝에 발생하는 동적 변위 및 모멘트를 최대 150%까지 과대평가하는 경향을 보였다. 향후 성능기반 설계를 통해 비선형영역에서의 내진설계를 수행할 경우, 반복하중에 대

한 API p-y 곡선을 이용하면 실제 지진 하중에 대해 크게 보수적인 설계를 초래할 가능성이 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 연구비 및 한국환경정책·평가연구원에서 기본과제로 수행된 "전략환경영향평가 검토"과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. American Petroleum Institute (API) (1987), "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms", API Recommendation Practice 2A (RP 2A), 17th edition.
2. Dou, H. and Byrne, P.M. (1996), "Dynamic Response of Single Piles and Soil-pile Interaction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.1, pp.80-96.
3. Kondner, R.L. (1963), "Hyperbolic Stress-strain Response:Cohesive Soils", *J. Soil Mechanics and Foundation Div*., ASCE, Vol.87, No.1, pp.115-144.
4. Korean Society of Civil Engineers (KSCE) (2001), "Bridge Design Criteria of Korea".
5. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (2001), "Static and Dynamic Lateral Loading of Pile Groups, NCHRP Report 461", Transportation Research Board - National Research Council., pp.13-21.
6. Ovesen, N. K. (1979), "The Scaling Law Relationship", Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, Vol.4, pp.319-323.
7. Ting, J.M., Kauffman, C.R., and Lovicsek, M. (1987), "Centrifuge Static and Dynamic Lateral Pile behaviour", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.198-207
8. Yang, E.K., Jeong, S.S., Kim. J.H., and Kim, M.M. (2011), "Dynamic p-y Backbone Curves from 1g Shaking Table Tests", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.15, No.5, pp.813-821.
9. Yoo, M.T., Choi, J.I., Han, J.T., and Kim, M.M. (2013), Dynamic p-y Curves for Dry Sand from Centrifuge Tests, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.17, Issue 7, pp.1082-1102.

Received : June 4th, 2018
Revised : June 22nd, 2018
Accepted : June 25th, 2018